

基于梁单元的薄壁筒桩与土相互作用分析

曹广德,李同春

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 用三维梁单元模拟混凝土薄壁筒桩的受力变形特征,用薄层接触面单元模拟桩与土体之间的相互作用,薄壁圆筒表面上的结点线位移用梁单元出口结点的线位移和转角位移表示,根据静力平衡条件提出了由接触面约束内力和桩上作用荷载求解桩体内力的计算公式,从而建立了桩-土相互作用的有限元分析方法。对某工程薄壁筒桩在水平荷载作用下的桩体变形和内力进行分析,并与现场试验结果进行了比较,结果表明上述分析方法是正确的。

关键词 薄壁筒桩 桩土相互作用 梁单元 接触面单元 有限元分析

中图分类号 :TV332.12 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)02-0034-03

Beam element-based finite element analysis of interaction between soil and thin-walled cylindrical piles//CAO Guang-de, LI Tong-chun(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)
Abstract :The 3-D beam element was used for simulating the stress-deformation characteristics of concrete thin-walled cylindrical piles, and the thin layer interface element was used for simulating the interaction between soil and piles. The nodal linear displacement on the surface of thin-walled cylindrical piles was expressed with the linear and angular displacements at exit nodes of beam elements. The computational formula for internal forces of piles in terms of interface restraining forces and loads on piles was given by use of the static equilibrium conditions, and the finite element analysis method for interaction between piles and soil was further developed. The method was applied to deformation and internal force analysis for thin-walled cylindrical piles under horizontal loads in a project, and correctness of the method was verified by comparison of the analyzed result with that of the field test.
Key words :thin-walled cylindrical pile ;interaction between pile and soil ;beam element ;interface element ;finite element analysis

桩-土相互作用的有限元分析中,桩结构的有限元模拟有许多方法,对于群桩有平面杆系有限元方法^[1]、等代空间梁单元法^[2]等,而单桩则有常规实体单元法^[3]、梁杆单元法^[4,5]等。采用一般的梁杆单元来离散桩结构忽略了桩体的几何结构,避免了网格加密,一定程度上反映了桩-土相互作用的特点,但如何合理考虑桩-土相互作用及变形协调是问题的关键。文献^[6]提出的广义位移法为解决桩与土体间的变形协调问题提供了很好的思路,文献^[7]在实体桩与土体的相互作用中得到了应用。桩-土相互作用一般通过接触面单元来模拟,分为无厚度的弹簧单元^[8]和厚度较小的薄层单元^[9],但用梁单元模拟桩并同时解决好桩-土相互作用及变形协调问题的研究并不多见。随着施工机械及施工工艺的提高,工程中越来越多地采用强度高、混凝土用量省的薄壁圆筒空心桩,这种桩-土相互作用的研究也不多见。本文以梁单元模拟桩体的受力变形特性,用广义位移法解决桩与土间的变形协调问题,同时采用厚度较小的薄层单元模拟桩

与土体的相互作用,从而建立了薄壁筒桩与土相互作用的有限元分析方法。

1 梁单元及薄壁筒桩表面结点位移

根据文献^[6]中广义位移法的概念,可导出以两结点梁单元的出口结点位移表示的薄壁筒桩表面任一结点的位移表达式。

对于如图 1 所示的三维梁柱单元,其单元出口自由度为

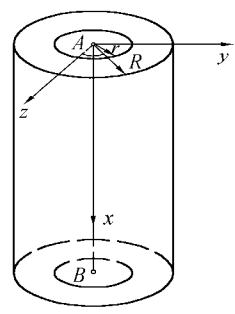


图 1 三维薄壁筒桩梁单元

$$\delta^e = (u_A, v_A, w_A, \theta_{Ax}, \theta_{Ay}, \theta_{Az}, u_B, v_B, w_B, \theta_{Bx}, \theta_{By}, \theta_{Bz})^T \quad (1)$$

则薄壁筒桩表面上任意一点的位移为

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} = T_A \begin{bmatrix} u_A \\ v_A \\ w_A \\ \theta_{Ax} \\ \theta_{Ay} \\ \theta_{Az} \end{bmatrix} + T_B \begin{bmatrix} u_B \\ v_B \\ w_B \\ \theta_{Bx} \\ \theta_{By} \\ \theta_{Bz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_A = \begin{bmatrix} N_1 & -\gamma N_3' & -z N_3' & 0 & z N_4' & -\gamma N_4' \\ 0 & N_3 & 0 & -N_1 z & 0 & N_4 \\ 0 & 0 & N_3 & N_1 \gamma & -N_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_B = \begin{bmatrix} N_2 & -\gamma N_5' & -z N_5' & 0 & z N_6' & -\gamma N_6' \\ 0 & N_5 & 0 & -N_2 z & 0 & N_6 \\ 0 & 0 & N_5 & N_2 \gamma & -N_6 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $N_1 \sim N_6$ 均为梁单元的位移形函数， $N_1 = 1 - x/l$ ， $N_2 = 1 - x/l$ ， $N_3 = 1 - 3x^2/l^2 + 2x^3/l^3$ ， $N_4 = x - 2x^2/l + x^3/l^2$ ， $N_5 = 3x^2/l^2 - 2x^3/l^3$ ， $N_6 = -x^2/l + x^3/l^2$ ； $N_1' \sim N_6'$ 分别为形函数 $N_1 \sim N_6$ 对 x 的偏导数。

2 桩-土相互作用接触面单元

结构与土的相互作用主要考虑结构与土接触面之间的相对变形，这种变形的产生是结构体的变形、土的变形及结构与土的相互作用的结果。当土体假设为弹塑性材料时，不论接触面光滑或是粗糙，接触面上的抗剪强度均小于土体内的抗剪强度。

本文采用文献[9]提出的薄层接触面单元，其接触面单元构造方法如下：保持单元底边(平面)或底面(空间)的坐标不变，求解底边或底面的法向方向余弦，将底边(平面)或底面(空间)的坐标值沿法向加上接触面的厚度成为边顶(平面)或顶面(空间)的坐标值。接触面采用文献[10]提出的广义摩尔库仑屈服准则，文献[9,11]证明了该接触面单元的数值稳定性。

3 桩内力计算

利用桩与土之间设置的接触面单元可以非常方便地求解桩上指定截面上的内力。设指定截面上部桩与土之间的接触点集合为 $P = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ ，土作用在桩上的约束内力集合为 $\{F_{xi1}, F_{yi1}, F_{zi1}, F_{xi2}, F_{yi2}, F_{zi2}, \dots, F_{xin}, F_{yin}, F_{zin}\}$ 。由于接触面单元厚度接近于零，可不计接触面单元上作用的外荷载，同时可不计接触面单元沿厚度方向力的传递，则由该指定截面上部接触面单元集合组成脱离体的静力平衡

条件可得

$$F = -\psi \left(\int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega \right) \quad (5)$$

式中： B 为应变矩阵； Ω 表示指定截面上部接触面单元集合； ψ 表示只取与 P 相关点上的值； σ 为接触面单元内部应力向量。

设 z 轴为桩的轴线方向，指定该截面上相对于形心点的内力为 $p = (N, Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_z)^T$ ，则由式(5)得到的 F 可求得 p 。

$$\begin{cases} N = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} F_{zij} + N_0 \\ Q_x = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} F_{xij} + Q_{x0} \\ Q_y = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} F_{yij} + Q_{y0} \\ M_x = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} F_{zij}(y_{ij} - y_0) + M_{x0} \\ M_y = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} F_{zij}(x_{ij} - x_0) + M_{y0} \\ M_z = \sum_{i_j=i_1}^{i_n} [F_{xij}(y_0 - y_{ij}) + F_{yij}(x_{ij} - x_0)] + M_{z0} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $(N_0, Q_{x0}, Q_{y0}, M_{x0}, M_{y0}, M_{z0})^T$ 为直接作用在桩上的外荷载。

4 算例

上海浦南东片出海闸工程南段导流堤工程采用联体薄壁筒桩组成两道导流堤挡墙，挡墙内开挖形成出海河道。该工程采用的薄壁筒桩外径1000mm，内径600mm，桩长14m，14根 $\varnothing 16$ 的主筋通长布置。工程场地的主要物理力学指标见表1，计算简图见图2。

表1 场地地基土物理力学性质指标

土层	平均层厚/m	湿密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa
1	3.60	1.98	12.60	20.0	22.3
2	2.46	1.94	9.00	17.45	20.0
3	8.07	1.82	6.82	16.2	15.9
4	8.31	1.75	4.76	13.9	15.2

为了解薄壁筒桩在水平荷载作用下桩身应力应变的分布情况，进行了单体薄壁筒桩试验^[12]，图3为薄壁筒桩上布置的测点位置。试验时加载点离地面3cm，在240kN的水平荷载作用下，实测桩身最大弯矩为217kN·m，位置在2m深度，桩顶最大水平位移为5.96mm，不同高层混凝土最大垂直拉应力值见表2。

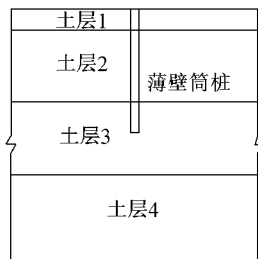


图2 计算简图

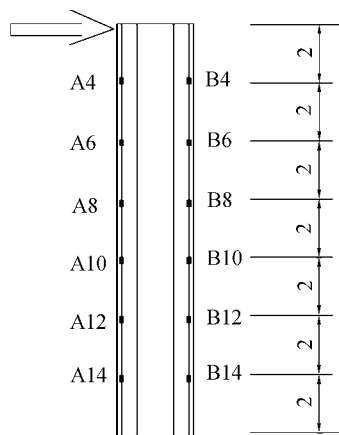


图3 试验测点位置(单位:m)

表2 水平荷载240kN时混凝土拉应力实测值与计算值比较

测点	实测值	计算值	测点	实测值	计算值
A4(深2m)	2539.7	2501.9	A10(深8m)	954.3	1270.7
A6(深4m)	2388.5	2228.1	A12(深10m)	402.6	710.3
A8(深6m)	1625.4	1706.4	A14(深12m)	135.9	246.3

为了验证本文提出的分析方法的正确性,进行了相应的有限元分析,图4为计算分析采用的有限元网格。分析时薄壁筒桩按线弹性考虑,分成14段梁单元,土体采用摩尔-库仑屈服准则,泊松比取为0.35。桩体按弹性材料考虑,弹性模量取为30GPa,泊松比取为0.17。在240kN水平荷载作用下,计算得到桩顶最大水平位移为6.15mm,最大弯矩为214kN·m,位置与试验测得的相同,在2m深度,弯矩沿高度方向的分布见图5,由此换算得到的桩体最大垂直拉应力见表2。

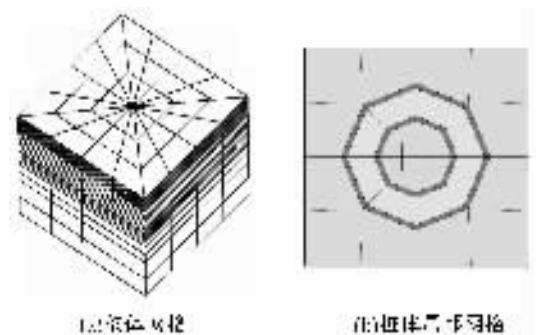


图4 有限元网格

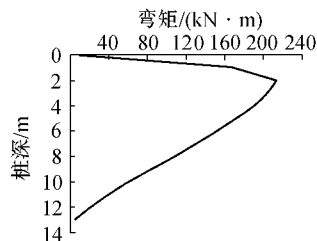


图5 弯矩沿桩深的分布

由表2可以看出计算得到的结果与试验得到的结果在应力较大部位是相当一致的。薄壁圆筒下部应力相对较小,试验与计算结果偏差较大,这可能与试验量测的精度有关。

5 结 语

本文以梁单元模拟桩体的受力变形特性,用广义位移法解决桩与土间的变形协调问题,同时采用厚度较小的薄层单元模拟桩-土相互作用,建立了薄壁筒桩与土相互作用的有限元分析方法。对某工程薄壁筒桩在水平荷载作用下的桩体变形和内力进行了分析,计算得到的桩顶最大位移、桩体最大弯矩及所发生位置与试验结果相当吻合,弯矩沿高度方向的分布规律也基本相同,从而论证了本文所提出的分析方法的正确性。

参考文献:

- [1] 张启富. 计算桩基的有限元方法及程序设计[J]. 合肥工业大学学报, 1999, 22(增): 9-13.
- [2] 黄林, 卜建清, 满洪高. 群桩的等代空间梁单元法[J]. 石家庄铁道学院学报, 2000, 13(4): 87-90.
- [3] 刘利民, 姜静, 陈竹昌. 复合桩基工作性状的非线性分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 56-60.
- [4] 陈小平, 闫军. 深基坑支护结构的三维杆系有限元分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 258-261.
- [5] 张友良, 陈从新, 夏元友. 杆件有限元法在抗滑桩设计中的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(1): 30-32.
- [6] 钟万勰, 朱建平. 薄壁杆件有限元分析中的广义位移法[J]. 大连工学院学报, 1985, 24(4): 25-30.
- [7] 廖雄华, 王蕾笑, 周健. 基于广义位移模型的大直径桩体结构单元内力分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(10): 34-36.
- [8] GOODMAN R F, TAILOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journ Soil Mech & Found Div, ASCE, 1968, 94(3): 637-660.
- [9] 姚纬明, 李同春, 任旭华. 带软弱结构面岩体的弹塑性有限元分析[J]. 河海大学学报 自然科学版, 1999, 27(3): 34-38.
- [10] 李同春, 温召旺. 拱坝应力分析中的有限元内力法[J]. 水力发电学报, 2002(4): 18-24.
- [11] 姚纬明, 李同春, 任旭华, 等. 岩体材料包络型复合弹塑性计算模型[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 95-99.
- [12] 上海勘测设计研究院科研所. 浦南东片出海闸工程南段河道导流堤薄壁筒桩水平受力研究报告[R]. 上海: 上海勘测设计研究院科研所, 2002.

(收稿日期: 2005-01-05 编辑: 骆超)